

두개의 제어를 사용한 건물 내부의 온도변화와 에너지소비량을 계산하기 위한 해석적 연구

한 규 일

부경대학교 기계시스템공학과

A study on the analytical method for calculating the inside air temperature transient and energy consumption load of the building using two different controllers

Kyu-Il HAN

Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

Four different buildings having various wall construction are analyzed for the effect of wall mass on the thermal performance and inside building air and wall temperature transient and also for calculating the energy consumption load. This analytical study was motivated by the experimental work of Burch et al. An analytical solution of one-dimensional, linear, partial differential equations is obtained using the Laplace transform method, Bromwich and modified Bromwich contour method. A simple dynamic model using steady state analysis as simplified methods is developed and results of energy consumption loads are compared with results obtained using the analytical solution. Typical Meteorological Year data are processed to yield hourly average monthly values. This study is conducted using weather data from two different locations in Korea: Daegu having severe weather in summer and winter and Jeju having mild weather almost all year round. There is a significant wall mass effect on the thermal performance of a building in mild weather condition. Buildings of heavyweight construction with insulation show the highest comfort level in mild weather condition. A proportional controller provides the higher comfort level in comparison with buildings using on-off controller. The steady state analysis gives an accurate estimate of energy load for all types of construction. Finally, it appears that both mass and wall insulation are important factors in the thermal performance of buildings, but their relative merits should be decided in each building by a strict analysis of the building layout, weather conditions and site condition.

Keywords: Energy consumption load, Wall mass effect, Comfort level, Proportional control, Heavy weight construction

*Corresponding author: kihan@pknu.ac.kr, Tel: 82-51-629-6194, Fax: 82-51-629-6188

서 론

전 세계적인 에너지 사용량의 증가와 에너지 비용의 증가에 따라 온실가스 배출을 통한 지구 온난화의 방지뿐만 아니라 에너지 비용의 절감이 매우 필요한 사항으로 대두되었다. 우리나라는 비록 면적은 좁지만 지형이 남북으로 길게 배치되어 있고 또 북쪽의 대륙성기후의 영향을 많이 받는 서울, 대전, 대구 등 분지형태의 지역과 또 남해안 인근 및 제주도 등 해양성 기후의 형태를 가진 지역으로 기후형태가 다른 도시로 이루어져 있다고 볼 수 있다.

건물 내 에너지 소비량을 감소시키기 위한 연구는 1980년대 전 세계에 몰아친 에너지 파동에 의하여 80년대 들어 활발하게 연구되었으며, 특히 1984년 미국의 Burch et al. (1984)이 이 연구를 위한 모델하우스를 건설하여 실험적 연구를 한 것이 건물 에너지소비량을 분석하기 위한 시발점이라 할 수 있다. Mitalas et al. (1967, 1968)은 건물의 모퉁이를 통한 열흐름은 무시하고 다른 많은 가정을 적용하여 1차원적인 분석을 실시하였다. Zabinski (1974)는 건물의 에너지 손실을 건물 내 외부 공기온도차에 초점을 맞춰 분석하였으며, 다양한 Thermostat 설정온도에 따른 건물 에너지 소비량의 효과를 연구하였다. Kusuda (1976, 1981)와 Croll et al. (1995)은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 건물 히팅 로드를 계산하기 위한 연구를 실시하였다. Stephenson et al. (1971)은 Z-transfer function을 사용하여 에너지 소비량을 계산하였는데 Z-transfer function은 복합적으로 이루어진 건물 벽면구조에 정상열전달이 아닌 과도열전달을 아주 간편하게 적용할 수 있는 방법임을 입증하였다. 국내에는 이와 비슷한 연구가 그다지 활발하지 않고, 여러 가지 경우 (다양한 벽면구조, 다양한 기후조건)를 적용하여 온도와 에너지소비량을 분석한 자료는 거의 없다고 할 수 있다.

본 연구는 기후 형태가 다른 지역에 벽면구조가 다른 건물을 건축했을 때 여름철 냉방과 겨울

철 난방에 사용되는 에너지 소비량이 어떻게 변화할 수 있을지를 분석하였다. 이를 분석하기 위하여 실제로 관련 지역에 건물을 짓고 실험기기를 설치하여 분석한다면 많은 비용이 소요될 것이다. 이 점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 실제 상황에 근접한 수학적 모델링을 만들고, 이를 풀기 위한 해석적 해를 구하여 (Carslaw et al., 1959) 건물 내의 실내온도 변화 및 벽면 온도의 변화, 그리고 에너지 소비량의 계산을 쉽게 산출할 수 있는 모델 (Meyers, 2001)을 개발하였다. 이를 통하여 벽 구조가 다른 건물에 벽이 구성하는 재질의 질량효과가 열 성능에 미치는 영향을 분석할 수 있었다. 또한 해석적 해를 구한 후 필요한 온도 계산 및 에너지 소비량을 산출할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 만들었다.

실내온도 변화와 에너지 소비량은 실내에 두 가지 형태의 온도조절기 (개폐식 온도조절기, 비례식 온도조절기)를 사용하여 두 온도 조절기의 성능과 실내에 있는 사람이 느끼는 안락도 (comfort level)의 차이점을 분석하였다.

해석적 해를 이용한 결과의 분석과 아울러 여러 가지 가정 (정상상태 가정을 통한 분석)을 통한 해와 정확하고 엄밀한 해의 계산 결과와의 비교를 통하여 간편해의 타당성을 분석하였다. 따라서 기후 조건과 건물 벽면구조의 변화에 따라 오차범위를 계산하여 간편해의 결과를 적용할 수 있는 범위를 구축하였다.

따라서 본 연구의 모델을 적용하여 여러 형태의 건물이 각기 다른 기후를 가진 지역에 각각 건축되었을 때 간단하게 필요한 벽면구조를 선택할 수 있는 경제적 이점이 있으며, 실제 건축을 통한 시행착오 없이도 에너지 절약을 위한 적합한 건물을 건축하여 많은 비용을 절감할 수 있으리라 생각된다.

연구내용 및 방법

본 연구의 배경은 미국에서 실시되었던 Burch et al. (1984)의 연구를 바탕으로 한다. 그는 가로

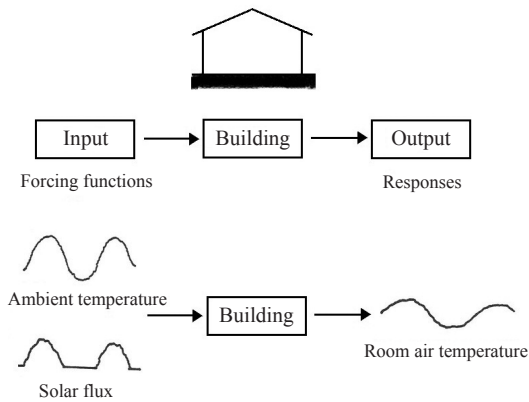


Fig. 1. Building system for simulation.

세로 높이가 각각 6.1m, 6.1m, 2.3m인 독실개념의 건물을 구축하여 실험을 하였다. 본 연구의 모델링을 위한 건물의 크기와 벽면구조는 그가 사용한 것과 동일한 구조로 하였다.

건물의 종류는 단열되어 있고 가벼운 재질의 나무프레임을 사용한 건물 #1, 벽돌구조로 내부 벽 표면에 단열재를 사용한 건물 #2, 단열재를 사용하지 않고 벽돌로 된 건물 #3, 벽돌구조로 외부 벽 표면에 단열재를 사용한 건물 #4로 구성되어 있으며 건물 시뮬레이션을 위한 구조도는 Fig. 1과 같다.

기후의 적용으로는 대륙성 기후와 해양성 기후를 가진 2개 지형 (대구, 제주)을 선택하고, 이를 모델링에 적용하기 위하여 각 시간의 기후 데이터를 연속함수 형태로 바꾸는 Fast Fourier Transform 방법을 사용하였다 (Brigham, 1974).

벽면 내부의 온도를 계산하기 위한 이론적 배경은 에너지 평형에 의한 미분방정식과 경계조건, 초기조건을 사용하였다 (Kreyszig, 2006). 실내온도를 계산하기 위한 방정식은 다음과 같다.

$$C_A dT_A/dt = -h_i A (T_A - T_i) - C_A' I (T_A - T_\infty) + Q \quad (1)$$

$$C_A = (\rho C_v)_A V_A \quad (2)$$

$$C_A' = (\rho C_p)_A V_A \quad (3)$$

$$I' = C_A' I / C_A \quad (4)$$

$$T_A(0) = T_i \quad (5)$$

여기서, h_i 는 건물 내 대류열전달계수, C_p, C_v 는 각각 정압비열과 정적비열이며, A 는 열이 흐르는 방향에 수직인 벽면의 면적, I 는 실외공기 침투계수, Q 는 실내 냉난방을 위한 에너지소비량, V_A 는 실내 공기의 부피를 나타내며 T_i 는 초기 실내의 온도이다.

벽면 내부온도를 계산하기 위한 미분방정식과 건물 내 공기온도를 위한 미분방정식은 서로 커플링 상태이기 때문에 두 미분방정식을 같이 연립해서 풀어야만 한다. 본 연구에서 사용한 기후 자료는 앞서 언급한 바와 같이 대륙성 기후와 해양성 기후를 가진 2개의 지형으로써 대구와 제주의 여름 (8월)과 겨울 (1월) 데이터를 사용하였으며 태양 열 유속과 대기온도의 시간별 평균값을 사용하였다. 태양 열 유속의 계산은 Duffie et al. (2000)의 방법을 참고로 하였다. 설계 목적상 벽면은 남쪽을 향하고 있으며 수직 벽으로 간주하였다. 태양 열 유속 계산을 위한 8월과 1월의 지면 반사율은 0.2를 택하였다.

각 시간마다 구해진 하루에 해당하는 24개의 불연속 데이터는 Fast Fourier Transform 방법을 통하여 연속된 선형으로 전환하였고, 이를 이용하여 해석적 해를 구하였으며 그 관계식은 아래와 같다.

$$S^*(t) = b_0 + \sum_{i=1}^{11} [b_i \cos(\omega_i t + \Phi_i) + c_i \sin(\omega_i t + \Phi_i)] \quad (6)$$

$$T_\infty(t) = d_0 + \sum_{i=1}^{11} [d_i \cos(\omega_i t + \Phi_i) + e_i \sin(\omega_i t + \Phi_i)] \quad (7)$$

여기서, b_0 는 태양열유속의 DC component 이고 d_0 는 대기온도의 DC component 이다.

실내의 온도를 제어하기 위한 온도조절기는 각각 개폐식과 비례식을 사용하였고, 비례식 온도조절기를 위한 방정식은 다음과 같다.

$$Q = \Gamma (T_S - T_A) \quad (8)$$

여기서, Γ 는 비례상수, T_S 는 실내공기 설정온도이다.

제시된 에너지 평형식에 기초한 미분방정식

을 Laplace 전환식을 사용하고 Bromwich contour 방법과 Modified Bromwich contour 방법을 사용하여 해석적 해를 구하였다.

2가지 조절기를 사용하여 실내온도의 변화를 비교해 봄으로써 어떤 기후조건에서 어떤 벽면 구조를 가진 건물을 건축할 때 가장 사람이 실내에서 느끼는 안락도가 최대가 될 것인지를 검토하였다. 또한 개폐식 온도조절기를 사용했을 때 제어기가 개폐되는 사이클을 분석함으로써 에너지 절약의 관점에서 가장 최적의 벽면구조를 가진 건물을 판단하였다.

본 연구에서 구해진 해석해가 정확하다고 하더라도 해를 구하고 답을 얻기 위한 프로그래밍에는 많은 노력과 시간이 소요되므로, 합당한 가정을 많이 적용하여 간편해를 구하여 엄밀해와 비교해 보았다. 구하여진 해석적 해는 Fourier 수와 Biot 수 등 무차원 수를 사용하여 표시할 수 있고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = T(x', t', F_o, Bi_1, Bi_2, \hat{a}LS^*/(kAT), \Delta T_A/\Delta T, QL^2/C_A \alpha \Delta T), \text{ 초기조건들} \quad (9)$$

여기서, 두 개의 Biot 수는 각각 다음과 같다.

$$Bi_1 = h_e L/k \quad (10)$$

$$Bi_2 = h_i L/k \quad (11)$$

계산 결과식을 이용하여 두 가지 다른 기후조건 각각에 대한 4가지의 벽면구조를 가진 빌딩을 분석하였다. 또한 각각에 대하여 두가지 종류의 온도조절기를 적용하여야 하기 때문에 경우의 수가 16가지가 되므로 많은 경우에 대하여 온도와 에너지소비량을 비교하여야 하므로 결과를 쉽게 요약해서 볼 수 있는 도표를 만들었다. 또한 개략적인 에너지 소비량을 계산하기 위하여 정상상태 분석법을 사용하였다. 분석을 간소화하기 위하여 대기온도와 태양열복사가 합성된 태양-대기 합성온도를 사용하였으며 (ASHRAE Handbook, 1982) 이는 다음 식과 같다.

$$T_{sol-air} = T_\infty + \hat{a}S/h_e - \varepsilon \Delta R/h_e \quad (12)$$

여기서, ε 는 지표면의 방사율, ΔR 은 대기온도 상에서 하늘과 주변으로부터 조사된 장파의 복사 에너지와 흑체에 의한 복사에너지의 차를 나타낸다. 정확한 ΔR 은 구하기 어렵고 수직 벽에서는 무시할 수 있을 만큼 작은 값이기 때문에 위 식은 다음 식으로 다시 쓸 수 있다.

$$T_{sol-air} = T_\infty + \hat{a}S/h_e \quad (13)$$

따라서 건물을 위한 정상상태 열 흐름은 다음 식을 이용하여 계산될 수 있다.

$$Q_S = \pm UA (\overline{T_{sol-air}} - T_A^*) + C_A' I (\overline{T_\infty} - T_A^*) \quad (+ \text{ sign; cooling, } - \text{ sign; heating}) \quad (14)$$

$$U = 1/(1/h_e + L/k + 1/h_i) \quad (15)$$

여기서, U 는 총합열전달계수, $\overline{T_{sol-air}}$, $\overline{T_\infty}$ 그리고 T_A^* 는 각각 평균 태양-대기온도, 대기온도, 건물 내부온도를 나타낸다. 외부로부터 건물 내부로의 공기침투에 의한 Q 가 식 (14)에 첨가된다. T_A^* 를 위한 두 개의 평균 실내공기온도가 사용되었다: 한 개는 22°C인 설정온도 (T_S)이고, 다른 하나는 개폐식 온도조절기를 사용했을 경우의 컴퓨터로 계산되어 나온 평균 실내온도 ($\overline{T_A}$)이다.

사이클링 율 (cycling rate)을 검사하기 위한 간편해 모델에서 식 (1)의 T_L 은 알고 있는 값이라고 간주되고 식 (1)은 다음과 같이 다시 정리되어 표현될 수 있다.

$$dT_A/dt + (a^* + b^*)T_A = a^*T_L + b^*T_\infty + c^* \quad (16)$$

여기서,

$$a^* = h_i A/C_A \quad (17)$$

$$b^* = C_A' I/C_A \quad (18)$$

$$c^* = Q/C_A \quad (19)$$

식 (16)은 다음 식이 된다.

$$dT_A/dt + B^*T_A = A^* \quad (20)$$

여기서,

$$A^* = a^*T_L + b^*T_\infty + c^* \quad (21)$$

$$B^* = a^* + b^* \quad (22)$$

T_L 과 T_∞ 가 짧은 사이클 구간에서 거의 일정함에 따라 A^* 는 일정하다고 볼 수 있다.

여기서 두 개의 초기조건이 고려될 수 있다. 식 (20)은 사이클 구간에 걸쳐서 초기조건들에 연계하여 풀 수 있다. 여기에는 고려하여야 할 2개의 초기조건이 있다. 그 하나는 데드밴드 (deadband)의 상위경계인 $T_A (T_A^+)$, 또 다른 하나는 데드밴드의 하위경계인 $T_A (T_A^-)$ 이다. c^* 는 보조에너지원의 값의 개폐에 따라 Q/C_A 가 되거나 영이 될 수 있다. 난방시 식 (20)의 해는 다음과 같다.

$$T_A = (T_A^- - A^*/B^*) \text{EXP}(-B^*t) + A^*/B^* \quad (23)$$

비난방시의 해는 다음과 같다.

$$T_A = (T_A^+ - A^*/B^*) \text{EXP}(-B^*t) + A^*/B^* \quad (24)$$

비난방시의 사이클은 보조에너지원이 없을 경우 ($Q=0$)의 실내 온도의 변화를 보여준다고 할 수 있다. 냉방시의 식 (20)의 해는 그 반대가 된다. 식 (23)과 (24)는 부분 사이클 시간을 표시하기 위하여 다음 식과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$t = (1/B^*) \ln [(T_A^- - A^*/B^*) / (T_A - A^*/B^*)] \quad (25)$$

$$t = (1/B^*) \ln [(T_A^+ - A^*/B^*) / (T_A - A^*/B^*)] \quad (26)$$

따라서, 정상상태 해석법을 사용하여 간편해를 구해보고 이 결과를 엄밀해와 비교하여 오차를 계산한 후 타당성이 있는 경우는 간편해를 사용할 수도 있기 때문에 사용가능한 오차의 범위를 도출하였다.

결과 및 고찰

보조에너지의 공급이 없는 경우의 결과는 식 (1)의 Q 를 영으로 놓음으로써 가능하다. 이를 건물의 자유응답 (free response)이라고 칭할 수 있으며, 에너지의 공급이 없기 때문에 Fig. 1에서 보는 바와 같이 건물에 작용하는 기후조건에 응답하여 건물 내 온도가 증감할 것이다. 보조에너

지가 없는 상태에서의 기후조건은 강제응답 (forced response)조건을 생성한다. 이 강제함수

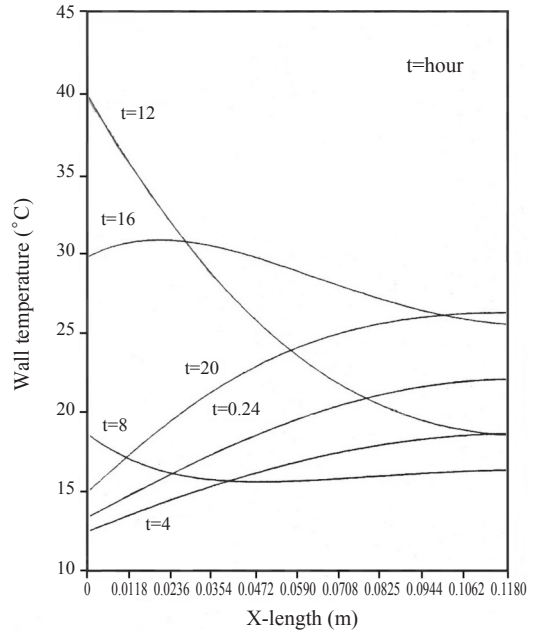


Fig. 2. Wall temperature profile, free response, at seven different times (House #1, Jeju, August).

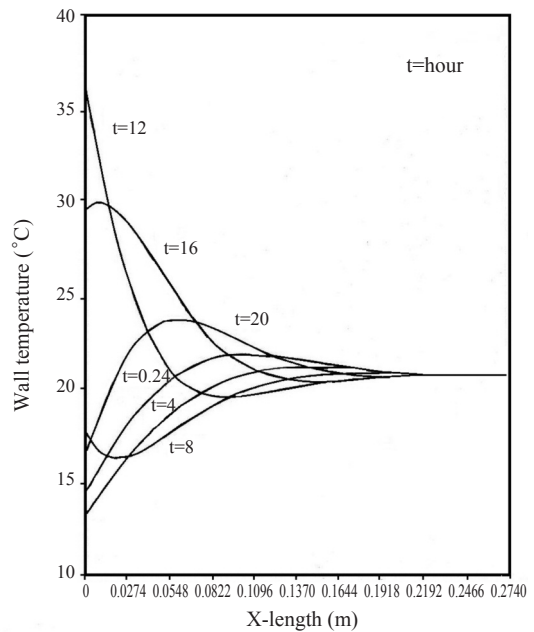


Fig. 3. Wall temperature profile, free response, at seven different times (House #2, Jeju, August).

(forcing function)는 Fourier 급수의 형태이기 때문에 실내온도의 유형은 사인함수 형태가 되며, 최대 실내온도는 건물 내의 에너지 저장에 기인하여 최대 대기온도보다 늦게 나타난다.

열파의 침투현상을 조사하기 위한 그래프는 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었으며, 매 4시간마다의 온도변화를 보여준다. 건물 #1은 최대의 실내온도 변화 기조에 의하여 $x=L$ 에서 최대의 온도변화를 보여준다. 건물 #2는 높은 시간 지연 현상에 기인하여 $x=L$ 에서 최소의 온도변화를 보여주고 있다. 단열을 한 벽돌벽면으로 구성된 건물 #2는 거의 일정한 온도를 나타내고 있는데 이는 벽돌 벽면이 매우 많은 양의 에너지를 저장하고 또 방출하기 때문이다.

Fig. 4는 대구의 겨울철 모든 건물의 실내온도 변화를 나타낸다. 개폐식 온도조절기가 사용되므로 모든 건물의 실내온도는 온도조절기의 데드밴드 안에 주어진다. 데드밴드의 상위와 하위경계는 각각 23°C 와 21°C 로 주어졌다. 그림에서 보는 바와 같이 겨울철 난방 시 건물 내의

온도변화를 보면 온도상승은 온도하강보다 더 가파른 것을 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 여름철 제주와 겨울철 대구에서의 $x = L$ 에서의 벽 표면 온도의 변화를 각각 나타내고 있다. 사이클링 율은 실내온도의 변화율과 아주 유사하다. 그림에서 보는 바와 같이 건물 #1과 같이 가벼운 재질의 벽면구조를 가진 건물이 무거운 벽 재질을 가진 건물 #2, #3, #4보다 벽면온도변화의 폭이 더 큰 것을 알 수 있다. 각 건물에 대한 해당된 지역과 계절에서의 에너지 소비량은 Table 1에 정리하였다.

건물구조와 온도조절기와의 상관관계를 연구하기 위하여 4개의 다른 Q값에 대한 실내온도 변화가 분석되었다. Q의 절대값이 감소함에 따라 총 사이클 수는 감소하며 각 경우에 대한 비교를 Table 2에 나타내었다. Table에서 보는 바와 같이 비록 Q값이 많이 변하더라도 각 경우에 있어서의 에너지 소비량은 크게 차이가 나지 않는 것을 알 수 있다. 왜냐하면 본 연구에서는 잦은 사이클링에 대한 에너지의 비효율성은 고려

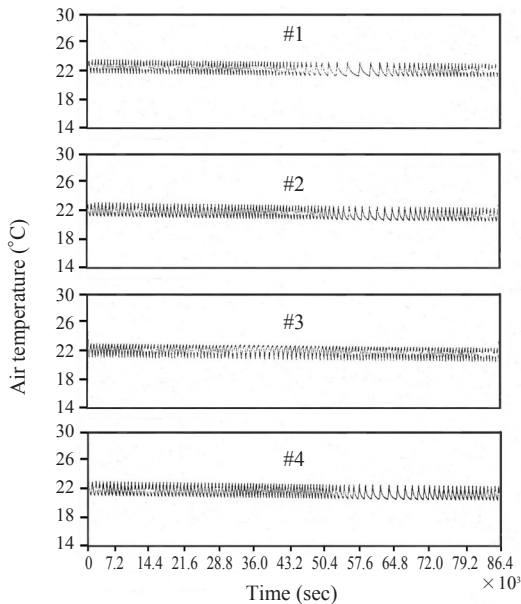


Fig. 4. Room air temperature variation for four simulated houses (on-off controller Daegu, January).

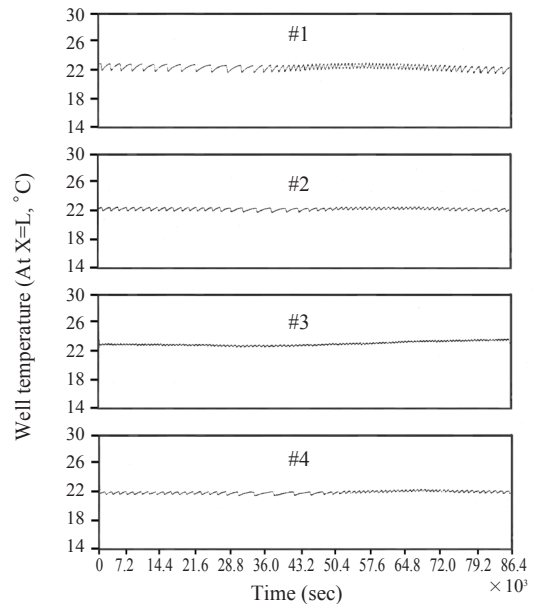


Fig. 5. Wall temperature (T_L) variation for four simulated houses (on-off controller Jeju, August).

하지 않았기 때문이다. 하지만 안락도와 에너지 절약의 차원에서 최적의 Q값을 선택하는 것은 매우 중요한 요소임을 알 수 있다.

앞서 설명한 바와 같이 비례온도조절기를 통

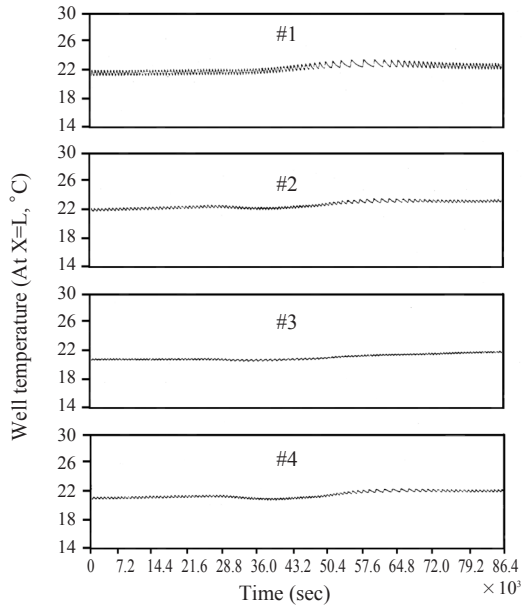


Fig. 6 Wall temperature (T_L) variation for four simulated houses (on-off controller Daegu, January).

한 연구를 병행하였다. 여러 종류의 T 값에 대한 실내공기 온도 변화를 분석하였다. 모든 건물에 대하여 많은 시도를 통하여 얻은 적합한 T 값을 결정하였다. Table 3은 각 건물의 경우에 대한 두 계절의 에너지 소비량을 나타낸다. Table에서 보는 바와 같이 건물의 열적 거동의 벽면 질량 효과는 제주와 같은 온화한 기후를 가진 곳에서는

Table 1. Energy consumption loads (on-off controller)

City, month, house #	Energy consumption load (MJ/day)
Jeju, August, #1	1.568
Jeju, August, #2	0.079
Jeju, August, #3	0.623
Jeju, August, #4	0.245
Jeju, January, #1	5.346
Jeju, January, #2	5.224
Jeju, January, #3	8.786
Jeju, January, #4	5.675
Daegu, August, #1	3.425
Daegu, August, #2	2.688
Daegu, August, #3	7.098
Daegu, August, #4	3.232
Daegu, January, #1	12.124
Daegu, January, #2	11.537
Daegu, January, #3	24.453
Daegu, January, #4	12.334

Table 2. Comparison when different Q 's are used for on-off control

City, month, house #	Q (W)	Load (MJ)	\bar{T}_A	\bar{T}_0	\bar{T}_L	σT_A	σT_0	σT_L	σT_s
			(°C)						
Jeju Aug. #1	-150	5.55	22.18	31.72	22.60	0.61	6.52	0.37	0.62
	-200	5.45	22.21	31.60	22.69	0.59	6.47	0.36	0.63
	-400	5.27	22.29	31.58	22.77	0.55	6.48	0.34	0.62
	-800	5.19	22.34	31.57	22.80	0.54	6.49	0.34	0.63
Jeju Aug. #4	-150	5.26	22.17	31.24	22.53	0.69	0.52	0.24	0.70
	-200	4.99	22.37	31.02	22.67	0.62	5.00	0.18	0.71
	-400	4.98	22.49	31.28	22.78	0.56	5.09	0.17	0.71
	-800	5.37	22.48	31.33	22.86	0.55	5.04	0.16	0.70
Daegu Jan. #1	-150	11.53	22.19	5.17	21.21	0.60	8.87	0.39	0.61
	-200	11.19	22.93	5.27	21.06	0.60	8.87	0.40	0.60
	-400	11.29	21.87	5.26	21.00	0.59	8.83	0.40	0.61
	-800	11.20	21.83	5.19	20.97	0.57	8.83	0.39	0.60
Daegu Jan. #4	-150	11.33	22.16	4.55	21.22	0.67	6.79	0.20	0.68
	-200	11.21	21.88	4.56	20.98	0.62	6.74	0.24	0.64
	-400	11.20	21.82	4.62	20.86	0.61	6.77	0.26	0.63
	-800	11.24	21.64	4.67	20.82	0.59	6.78	0.27	0.64

존재하지만, 대구와 같은 온화하지 않는 지역에서는 그렇지 않은 것을 알 수 있다. 그리고 비례식 온도조절기의 결과는 개폐식 온도조절기를 사용했을 때와 마찬가지로 결론에 도달하는 것을 알 수 있다.

식 (25)와 식 (26)에 의하여 사이클 타임이 계산되었으며, 계산된 결과는 엄밀해로 부터의 결과와 비교되었다. 결과에 대한 5가지 계산 방법은 다음과 같다: (1) 엄밀해로 부터의 정확한 결과, (2) 사이클의 시작 시 엄밀해로 부터 얻은 T_L 값과 사이클 종료시 얻은 T_L 값의 평균값 사용, 사이클 시작 시의 T_{∞} 값 사용, (3) 사이클 시작 시

T_L 값과 T_{∞} 값 사용, (4) 엄밀해로 부터의 T_L 값과 T_{∞} 값의 평균값 사용, (5) 정상상태 분석에 의한 평균 T_L 값과 T_{∞} 값 사용.

Table 4는 높은 사이클링 구역에서의 사이클 시간을 나타낸다. Table에서 보는 바와 같이 정확한 사이클 타임이 길어질 때에는 몇 가지 경우에서 사이클 타임을 얻을 수 없다. 또한 사이클 타임은 T_L 값에 매우 민감하다. 최대 오차는 5% 보다 작으며 대부분의 경우 오차는 2% 이내인 것을 알 수 있다. 하지만 오차는 엄밀해로 부터의 T_L 값과 T_{∞} 값의 평균값이 증가하거나 정상상태 분석법을 사용하였을 때 증가하는 것을 알 수 있다.

Table 3. Energy consumption loads (proportional controller, $\Gamma= 250 \text{ W/}^\circ\text{C}$)

City, month, house #	Energy consumption load (MJ/day)	
	(heating, cooling)	
* Jeju, August, #1	4.224	(2.255, 1.769)
Jeju, August, #2	0.678	
Jeju, August, #3	2.204	(1.630, 0.574)
Jeju, August, #4	0.746	
* Jeju, January, #1	5.933	(4.826, 1.107)
Jeju, January, #2	3.669	
Jeju, January, #3	7.754	
Jeju, January, #4	3.922	
* Daegu, August, #1	4.101	(0.318, 3.783)
Daegu, August, #2	3.004	
Daegu, August, #3	7.583	
Daegu, August, #4	3.135	
Daegu, January, #1	10.546	
Daegu, January, #2	9.525	
Daegu, January, #3	21.887	
Daegu, January, #4	10.006	

결론

본 연구를 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다. 남해안 인근의 도시 및 제주도 같은 온난한 기후를 갖고 있는 지역에서는 벽면의 질량 효과가 건물의 열 성능에 매우 중요한 것으로 나타났다. 이 효과는 벽면 구조를 관통하는 열파의 지연 효과에 기인하는 것으로 사료된다.

건물 #2, #4와 같이 단열재와 함께 질량이 무거운 재질을 사용한 건물이 온화한 기후조건에서 높은 안락도를 보여주었다. 이 경우 냉난방을 하지 않았을 때라도 건물 안의 최고온도와 최저온도의 차이는 그리 크지 않았다.

비례식 온도조절기를 사용하였을 때가 개폐식 온도조절기를 사용하였을 때보다 높은 안락도를 보여주었다. 안락도는 개폐식 온도조절기

Table 4. Comparison of cycling time in seconds (on-off controller, simple dynamic model)

City, month, house#	Result type				
	1	2	3	4	5
Jeju, Aug., #1	500, 212	545, 225	-, 269	-, 188	-, 169
Jeju, Aug., #2	789, 212	947, 200	-, 241	-, 189	-, 177
Jeju, Aug., #3	445, 245	468, 240	497, 231	453, 228	544, 225
Jeju, Aug., #4	700, 234	751, 235	-, 210	-, 191	-, 178
Daegu, Jan., #1	258, 360	253, 368	333, 609	206, 625	200, 957
Daegu, Jan., #2	237, 479	229, 460	240, 606	208, 597	192, -
Daegu, Jan., #3	595, 229	580, 218	736, 219	439, 229	522, 236
Daegu, Jan., #4	235, 449	231, 441	243, 527	215, 522	205, 1172

에서 데드밴드를 줄였을 때 증가되었으나 이 결과 개폐 사이클이 높아지고 에너지의 소모도 늘어나 적당한 데드밴드의 크기를 고려할 필요가 있었다.

에너지 소모량에 관한 한, 개폐식과 비례식 온도조절기는 그다지 큰 차이를 보이지 않았으나 안락도에서 두 조절기는 차이를 보여주었다.

정상상태를 이용한 단순분석 방법 (simplified method using steady state analysis)을 통한 에너지 소비량 결과는 정확한 해석적 방법을 통한 결과와 비교하였을 때, 몇 가지 경우를 제외하고 모든 건물의 벽면 구조물에 적용하여도 별로 큰 차이를 보이지 않았다. 특히 건물 내의 설정온도와 태양에너지와 대기온도를 합성한 온도의 평균 온도 (average sol-air temperature)의 차이가 클 경우에는 더욱 정확하였다.

모든 벽면구조의 건물에서 건물구조와 기후 조건, 그리고 사이클링 율 (cycling rate) 사이에 높은 커플링이 존재하였다.

결과적으로 보았을 때 건물 벽 질량과 벽면 단열재의 사용은 건물의 열 성능 증가에 매우 중요한 인자이나, 이러한 인자들은 건물의 레이아웃, 기후조건, 건축 위치 등을 엄밀히 분석한 후 결정될 사항이란 것이 증명되었다.

사 사

이 논문은 2010학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임 (PK-2010-068).

참고문헌

ASHRAE, 1982. ASHRAE handbook of 1981 fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, pp. 21.1-21.9.

Brigham, E.O., 1974. The fast Fourier transform. Prentice Hall, New Jersey, pp. 25-150.

Burch, D. M., D.F. Kritz and R.S. Spain, 1984. The effect of wall mass on winter heating loads and indoor comfort-an experimental study. ASHRAE Transac-

tions 90, Part 1, 94-121.

Burch, D.M., S.A. Malcolm and K.L. Davis, 1984. The effect of wall mass on the summer space cooling of six test buildings. ASHRAE Transactions 90, Part 1, 5-20.

Carslaw, H.S. and J.C. Jaeger, 1959. Conduction of heat in solids. Oxford Press, Great Britain, pp. 92-326.

Crall, G.C., C.D. Jones, C.F. Sepsy and J.W. Jones, 1995. A computer simulation and validation of a building heating, ventilating and air conditioning system. ASHRAE Transactions 81, Part 1, 506-518.

Duffie, J.A. and W.A. Beckman, 2000. Solar engineering of thermal processes, John Wiley & Sons, New York, pp. 28-110.

Kreyszig, E., 2006. Advanced engineering mathematics. John Wiley & Sons, New York, pp. 220-270.

Kusuda, T., 1976. Procedure employed by the ASHRAE task group for the determination of heating and cooling loads for building energy analysis. ASHRAE Transactions 82, Part 1, 305-314.

Kusuda, T., 1981. A comparison of energy calculation procedures. ASHRAE Journal, 23, 21-24.

Mitalas, G.P. and D.G. Stephenson, 1967. Room thermal response factors. ASHRAE Transactions 73, Part 1, III.2.1-III.2.10.

Mitalas, G.P., 1968. Calculation of transient heat flow through walls and roofs. ASHRAE Transactions 74, Part 2, 182-188.

Myers, G.E., 2001. Analytical methods in conduction heat transfer. McGraw-Hill, New York, pp. 175-205.

Stephenson, D.G. and G.P. Mitalas, 1971. Cooling load calculations by thermal response factor method. ASHRAE Transactions 73, Part 1, III.1.1-III.1.7.

Zabinski, M.P. and L. LoVerme, 1974. Fuel consumption in residential heating at various thermostat settings. ASHRAE Journal, 16, 67-70.

2011년 12월 22일 접수
 2011년 12월 30일 1차 수정
 2011년 12월 30일 수리